

DANOS EM PAREDES DE ALVENARIA DE FACHADA EM EDIFÍCIOS CORRENTES DE BETÃO ARMADO: LIÇÕES DO SISMO DE ABRIL DE 2009 DE L'ÁQUILA ITÁLIA

VICENTE, R.

Professor Auxiliar
Universidade de Aveiro
Aveiro - Portugal

RODRIGUES, H.

Aluno de Doutoramento
Universidade de Aveiro
Aveiro - Portugal

VARUM, H.

Professor Associado
Universidade de Aveiro
Aveiro - Portugal

COSTA, A.

Professor Catedrático
Universidade de Aveiro
Aveiro - Portugal

MENDES DA SILVA, J.A.R.

Professor Associado
Universidade de Coimbra
Coimbra - Portugal

RESUMO

Neste artigo relacionam-se as exigências de desempenho e estabilidade com as técnicas de construção de paredes em alvenaria da envolvente de edifícios correntes de betão armado. Em países europeus, a envolvente vertical dos edifícios é frequentemente constituída por paredes não estruturais de alvenaria, usando blocos perfurados verticalmente, ou ainda mais correntemente tijolos cerâmicos de furação horizontal. Estas paredes são tipicamente apoiadas e confinadas por uma estrutura de betão armado, constituída por pilares/paredes e vigas/lajes. Como estas paredes não têm uma função resistente, a sua influência sobre o comportamento global da estrutura é ignorada no dimensionamento das estruturas dos edifícios. Por outro lado, as suas condições de ligação à estrutura principal, normalmente, carecem de uma adequada pormenorização em projecto e a sua construção é deficiente. Em consequência, este tipo de elementos não-estruturais, são particularmente sensíveis às exigências de deformação e aceleração que lhe são impostas quando os edifícios são sujeitos à acção sísmica.

Um das causas mais comuns para a instabilidade e inadequado desempenho das paredes de alvenaria da envolvente exterior face acções sísmicas é o reduzido apoio destas paredes sobre a laje ou viga periférica. Esta reduzida largura de suporte é actualmente uma consequência da necessidade de correcção das pontes térmicas planas. Com esta intenção, os projectistas e construtores revestem a estrutura externa localmente, de modo a aumentar a sua resistência térmica, minimizando o desenvolvimento de patologias. No entanto, se não foram acauteladas as devidas medidas em projecto e obra, comprometem a estabilidade global dos painéis de alvenaria da envolvente, sobretudo aquando da ocorrência de um sismo. No sismo que afectou a região de Abruzzo, em Itália, em 6 de Abril de 2009, os danos não-estruturais foram muito expressivos, principalmente o colapso para fora do plano dos panos exteriores das paredes duplas em alvenaria de tijolo, comprovando o anteriormente exposto.

Os documentos técnicos e a normativa internacional (Eurocódigo 6, Eurocódigo 8, FEMA-356 e ATC-40) alertam para a necessidade de aplicação de critérios de verificação das deformações e dano nestas paredes não-estruturais. Neste artigo são propostas medidas para melhoria do desempenho, no plano e fora do plano, das paredes duplas, garantindo a sua integridade e estabilidade face a acções horizontais.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Âmbito

Elementos não-estruturais, como é o caso de paredes de alvenaria de enchimento, parapeitos, varandas, chaminés, etc, bem como infraestruturas sofrem distorções e deformações, ou até podem comprometer vida humana no caso de queda e condições de funcionamento do edifício. O sismo de Loma Prieta (1989) e Northridge (1994) são bons exemplos de avultadas perdas económicas associadas a danos não estruturais (30

milhões de US dólares). As paredes de de nevolvente externa em alvenaria dos edifícios pela Europa mudaram significativamente na última década, em consequência das exigências de desempenho térmico e controlo de condensações. Uma das medidas mais contraditórias é a correcção das pontes térmicas pelo exterior usando tijolos cerâmicos de furação horizontal correntes. Esta técnica conduziu à melhoria do desempenho térmico e redução de anomalias associadas a condensações superficiais, mas com riscos construtivos associados, que originam problemas de fissuração e estanquidade e com insuficientes requisitos de desempenho quando sujeito a acções sísmicas.

A causa mais comum para os problemas de instabilidade das paredes de alvenaria de enchimento das paredes de envolvente externa, quando sujeitas a acções horizontais, é a reduzida largura de apoio das paredes sobre as lajes ou vigas periféricas. O assentamento recorrendo ao apoio parcial é necessário para executar a correcção térmica pelo exterior, revestindo a estrutura de betão armado, constituindo uma forra térmica que melhora a resistência térmica nestes pontos singulares (pilares, vigas, etc.).

2. PAREDES DE ALVENARIA DE ENCHIMENTO E DE ENVOLVENTE EXTERNA

2.1 Correcção das pontes térmicas

As paredes de alvenaria de enchimento com condições de apoio parciais e de inexistente ligação, quer entre panos de parede, quer com a estrutura resistente têm apresentado em alguns casos fissuração grave e problemas de estabilidade. A correcção das pontes térmicas é realizado em vários países, no entanto quando se trata de recorrer a tijolos de furação horizontal com uma grande percentagem de vazios, superior a 60%, com baixa resistência à compressão e com septos com dimensões de 8-9 mm, este problema é muito mais preocupante.

A principal causa dos problemas de fissuração e instabilidade registados em vários edifícios com paredes de envolvente externa com condições parciais de apoio das paredes de envolvente é a reduzida largura de apoio. Esta situação conduz a tensões locais muito elevadas, cujos efeitos são agravados pela geometria interna do tijolo [Hendry *et al.*, 1997]. Nestas condições a fissuração pode ser muito grave, mesmo para reduzidos valores de carregamento vertical, dependendo das condições de suporte. Investigação desenvolvida por Vicente e Mendes da Silva [2006] incluiu uma campanha experimental e modelação numérica para a interpretação dos padrões de fissuração e modos de colapso de paredes correntes com diferentes condições de apoio. Foram utilizados tijolos cerâmicos correntes de furação horizontal e construídas paredes que foram sujeitas a diferentes condições de carregamento (centrado e excêntrico), com diferentes condições de apoio e registados valores de extensão e tensão associados à primeira fissuração e por fim de colapso parcial ou total.

Como já referido atrás, de modo a resolver a ponte térmica, projectistas e executantes adoptaram diversas soluções baseadas em insuficiente conhecimento tecnológico (ver Figura 1). De entre estas soluções de resolução das pontes térmicas, destacam-se as soluções que promovem o apoio parcial do pano exterior de uma parede dupla em 50-80mm, preservando sempre o alinhamento da fachada.

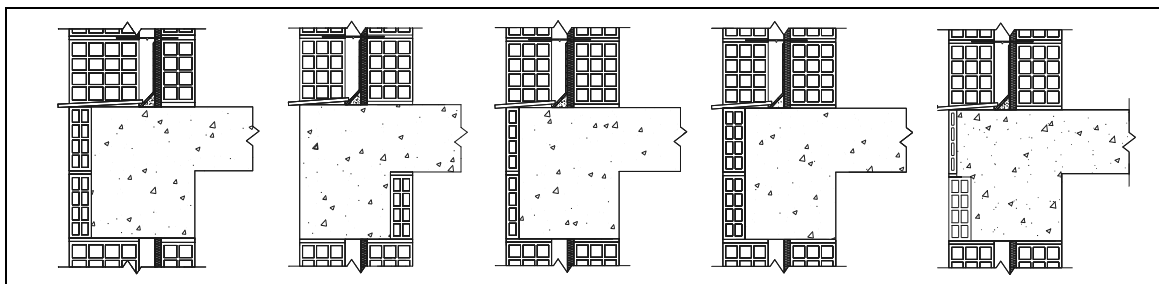


Figura 1: Soluções típicas de correcção de ponte térmica

Estas soluções são adoptadas e executadas sem nenhum cuidado de grampeamento dos panos de parede e sem nenhuma avaliação da resistência ou capacidade de deformação. Na Figura 2 observa-se dois casos em que ocorreu fissuração grave, impondo no caso da primeira situação a demolição e reconstrução do pano exterior da parede.

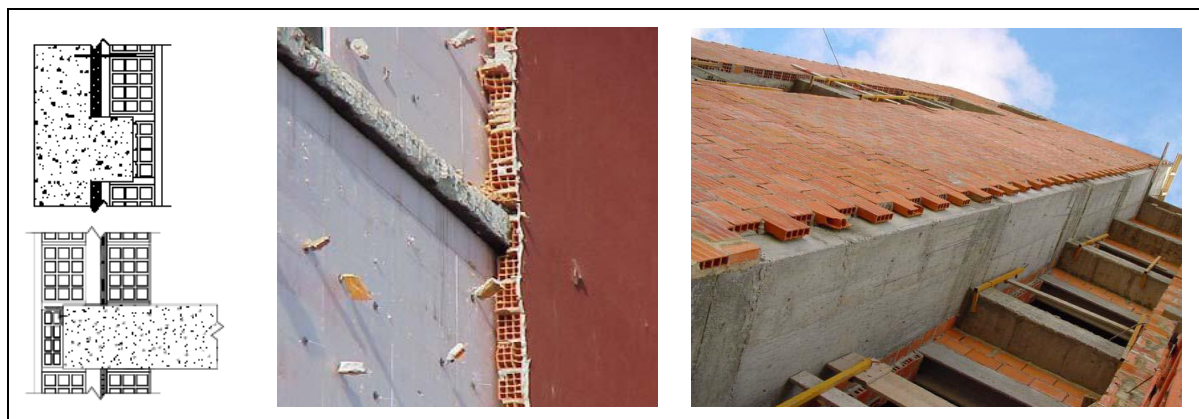


Figura 2: Dois exemplos de fissuração resultado da inadequada correcção das pontes térmicas com recurso ao apoio parcial do pano exterior de tijolo

Outros factores, para além da acção sísmica podem contribuir para o agravamento das consequências, tais como: excessivo peso dos revestimento exteriores, carregamento adicional ou excêntrico sobre as paredes, acção do vento, fluência e retracção da estrutura, variações de teor em humidade e temperatura, ausência de grampos, desconhecimento e validação tecnológica desta solução e qualidade medíocre da mão-de-obra, particularmente na execução de pontos singulares.

2.2 Contribuição das paredes de alvenaria de enchimento na resposta sísmica de edifícios

As paredes de alvenaria de enchimento de estruturas de betão armado não são considerados elementos estruturais, no entanto, reconhece-se a influência no comportamento global de estruturas de betão armado a acções horizontais [Crisafulli *et al.*, 2000]. Muitos autores têm estudado ao longo destes anos os efeitos das paredes de enchimento na resposta de estruturas de betão armado, revelando ter efeitos benéficos ou negativos [Rodrigues *et al.*, 2009]. As paredes de enchimento se uniformemente distribuídos e se considerados no cálculo de novas estruturas, podem por um lado ter uma natureza benéfica. Por outro lado a sua distribuição assimétrica pode introduzir irregularidades importantes e consideradas no cálculo [Varum, 2003]. Para os edifícios existentes em betão armado, construídos antes de 1980, e que se consideram ter um comportamento sísmico insatisfatório de acordo com requisitos actuais, são muito vulneráveis e constituem um grande risco de perda humana e de propriedade física.

Como referido, os painéis de enchimento em alvenaria corrente podem ter uma contribuição significativa numa estrutura de betão armado, no entanto, a interacção entre os painéis de alvenaria e os elementos confinantes de betão armado é complexo, e por causa destes aspectos, os painéis de enchimento são frequentemente negligenciados no cálculo de novas estruturas e na avaliação da vulnerabilidade de estruturas existentes.

Não considerando os painéis de enchimento introduz um erro na avaliação da resposta estrutural de um edifício, uma vez que modificam a rigidez, resistência, capacidade de dissipação de energia da estrutura e podem induzir mecanismos locais não previstos em modelos que não considerem as paredes de alvenaria. The observação de estruturas de betão armado danificadas em sismos recentes, é notório que parte dos danos estão associados com a modificação estrutural do sistema estrutural induzido por elementos não-estruturais como é o caso das paredes de alvenaria.

Considerando o colapso estrutural de edifícios em betão armado, dois principais mecanismos foram documentados. O primeiro caso associado a situações em que as paredes de alvenaria deixam uma porção de pilar livre, isto é alvenaria confinante não é assente até ao topo dos pilares, conhecido como *short column*. Se não foi considerado no cálculo, a *short column* com rigidez acrescida é submetida a um maior nível de acção de corte e que pode conduzir à rotura também por corte. Um Segundo caso é a ausência frequente de painéis de alvenaria num piso, frequentemente o piso térreo, devido ao seu uso (zonas de estacionamento e de natureza

comercial) indizindo uma variação de rigidez em altura originando um fenómeno global de piso débil, designado de *soft storey*. Adicionalmente a distribuição assimétrica das paredes de alvenaria de enchimento introduzem fenómenos de torção não previstos no cálculo, especialmente nos pilares dos portícos em betão armado da envolvente externa [Fardis, 2006].

Os painéis de alvenaria introduzem modificações significativas no comportamento estrutural de edifícios em betão armado, e podem por um lado ser uma contribuição benéfica para a segurança estrutural ou por outro despoletar mecanismos de cano ou colapso, daí que seja fundamental a sua consideração quer no cálculo de edifícios novos, como na verificação da segurança estrutural de edifícios existentes.

3. SISMO DE ABRUZZO

3.1 Danos em paredes de enchimento da envolvente externa

No recente sismo ocorrido na região de Abruzzo, Itália, particularmente na cidade de Aquila, a observação de danos não estruturais foi muito significativa, observando colapso para fora do plano da parede do pano externo de paredes de alvenaria. O sismo de Abruzzo afectou várias localidades com diferentes intensidades; com uma aceleração máxima registada de 0.675g, excedendo largamente o valor de 0.25g definido no código italiano. Da missão de reconhecimento feita, observou-se um grupo sistemático de danos, consequentes de problemas de construção de paredes.

Na Figura 3 é apresentada dano não-estrutural das paredes de envolvente externa de um edifício cde estrutura porticada em betão armado om seis pisos. As possíveis causas para a ocorrência destes danos estão associados com a maior susceptibilidade dos avançados e das varandas a níveis de aceleração vertical, esbelteza dos panos de alvenaria, falta de confinamento do pano exterior, ausência de sistemas de grampeamento entre panos de paredes e de conexão com as estruturas de betão armado confinante. Na Figura 3.1 é evidente a existência de um revestimento de forra cerâmica com deficiente adesão às vigas e insuficiente suporte do pano exterior em tijolo face-à-vista sobre a viga periférica/laje.

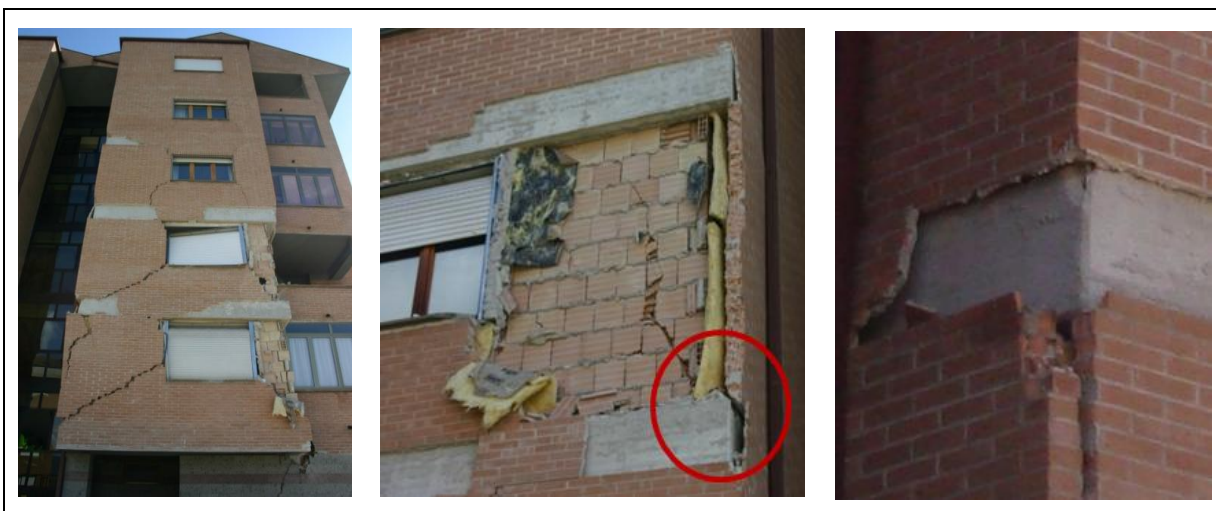


Figura 3: Fissuração e colapso da parede exterior do pano exterior da parede dupla

Na Figura 4 apresenta-se um desligamento extensivo do pano de parede exterior que forra externamente toda a estrutura devido à falta de sistema de grampeamento eficiente da parede e do sistema de isolamento à estrutura porticada. Nos dois casos anteriores é notório a fraca qualidade de execução das paredes (inadequado espessura e execução das juntas de assentamento dos tijolos).



Figura 4: Desligamento total do pano exterior da parede de envolvente externa

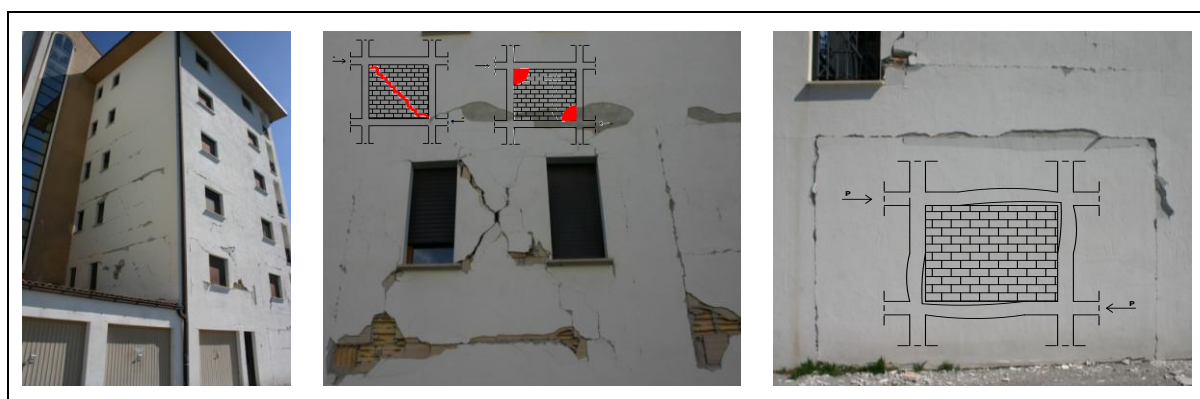


Figura 5: A fissuração generalizada resultante da resposta da parede no plano

Os panos de paredes exteriores esbeltas são naturalmente mais sensíveis à aceleração e deslocamento, de modo que as condições de ligação a outros panos de parede e paredes ortogonais, bem como as condições de conexão à estrutura resistente, fundamentais no comportamento (ver Figura 6). Devido a estes aspectos, os mecanismos de colapso para fora do plano podem ocorrer com maior facilidade. No entanto, o colapso para fora das paredes pode ocorrer para níveis de aceleração mais baixo, fragilizando e danificando a parede no plano (ver Figura 5).

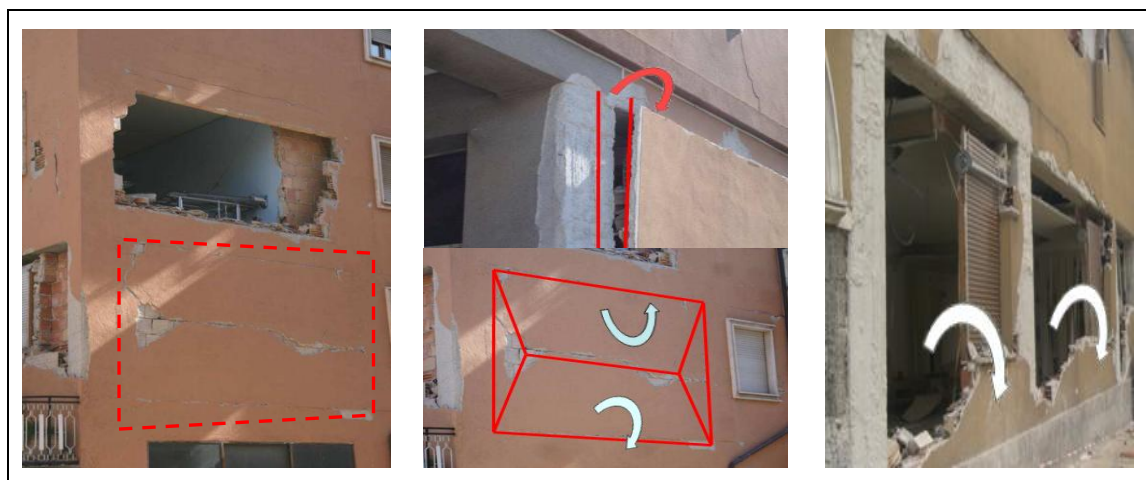


Figura 6: Colapso para fora da parede

Paredes de alvenaria não confinada, disprovido de elementos de cintagem na zona de cunhais e mudança de direcção (pilaretes), sofreram colapsos para fora do plano como se apresenta na Figura 7. Todos os problemas descritos acima, agravam e aumentam a potencialidade de mecanismos de colapso para fora do plano de painéis de alvenaria.



Figura 7: Colapso de paredes não confinadas

Danos no plano da parede são inevitáveis quando paredes de alvenaria de enchimento contribuem para a resposta sísmica do edifício. Na Figura 8 é apresentado dano no plano da parede típico e dano por fenómeno de *short column*.



Figura 8: Danos por corte no plano da parede

4. REQUISITOS DE DESEMPENHO

4.1 Códigos e normas

Reconhecendo a importância da influência dos painéis de alvenaria de enchimento no comportamento de edifícios de betão armado, nos últimos anos, os novos códigos e normas tem incluído critérios para a consideração da influência dos painéis de alvenaria na resposta das estruturas face a acções sísmicas, nomeadamente o Eurocódigo 8 [CEN, 2004], Eurocódigo 6 [CEN, 2005], FEMA 310 [1998], e o ATC-40 [1996].

Como exemplo, o Eurocódigo 8 [CEN, 2004], inclui recomendações gerais para elementos não estruturais, considerando que no caso de colapso, estes elementos são um risco para a vida humana e para a segurança estrutural do edifício e assim devem ser dimensionados para resistir à acção sísmica.

O Eurocódigo 8 refere ainda que além da verificação da segurança dos elementos não estruturais, deve ser verificada a segurança das ligações e ancoragens destes elementos, considerando a transmissão de esforços para a estrutura principal e a sua influência no comportamento global da estrutura. Reconhecendo que no caso particular dos painéis de alvenaria de enchimento confinados com os elementos de betão armado, sem qualquer elemento de ligação especial entre os painéis e a estrutura (conectores), a contribuição destes no comportamento global pode afectar a ductilidade das estruturas.

Para sistemas estruturais da classe de ductilidade, DCL, M e H, devem ser tomadas medidas apropriadas para evitar a ruptura frágil e prematura dos painéis de alvenaria no plano, assim como o colapso total ou parcial dos painéis esbeltos fora-do-plano, em especial painéis que apresentem esbeltezas superiores a 15.

O ATC-40 [1996] reconhece que os elementos não-estruturais têm apresentado níveis de dano elevados nos últimos sismos, no entanto o custo para reforçar estes elementos em edifícios existentes, de acordo com as normas recentes é elevado. Os elementos não estruturais, tradicionalmente, não têm sido tidos em conta na reabilitação e reforço das construções até a data. No entanto, a elevada vulnerabilidade destes elementos, tem sido investigada aumentando a consciência para a sua consideração. O nível de desempenho de elementos não-estruturais é apenas considerado para casos de grande perigosidade para encorajar uma abordagem custo-redução do risco deste tipo de elementos.

O FEMA 310 [1998], no que se refere à consideração dos elementos não estruturais na avaliação de edifícios, define que os elementos não-estruturais, paredes divisórias, revestimentos e parapeitos, devem respeitar os critérios de conformidade de acordo com o zonamento sísmico (espaçamento e ancoragem) e o procedimento de avaliação deve ser baseada em forças e os limites de drift.

A definição dos estados limites para os painéis de alvenaria de enchimento podem ser directamente relacionados com o *drift*. Com base no modelo de dupla biela equivalente, Magenes e Pampanin [2004] propuseram valores empíricos para diferentes níveis de dano dos painéis de alvenaria de enchimento. Por exemplo para um drift de 0,4% a 1,0% está associada o colapso do painel de alvenaria.

As recomendações do FEMA. FEMA-306 [1999] e FEMA-307 [1999] fornecem valores de referência dos drifts para edifícios de betão armado com painéis de alvenaria de enchimento. Os limites de drift propostos dependem do tipo de alvenaria, vão desde 1,5% para alvenaria de tijolo e até 2,5% para alvenaria de blocos de betão não confinado. Nestes documentos estão também indicados valores de referência de para o início da fissuração diagonal (drift de 0,25%) [Bell e Davidson, 2004]. Outros autores recomendam drifts para a verificação do estado limite de serviço entre 0,2% a 0,5%, dependendo do tipo de alvenaria. Valores limite de 0,2% são recomendados para painéis de alvenaria enchimentos confinados pelos elementos de betão armado [Valiasis e Stylianidis, 1989], e 0,5% é mais adequado para paredes divisórias leves de madeira, gesso e similares [Freeman, 1977].

4.2 Medidas de melhoria do comportamento global

No que respeita à melhoria da integridade e da estabilidade global dos painéis de alvenaria de enchimento as medidas adequadas propostas para melhorar no plano e fora-do-plano da face à acção sísmica, podem ser: i) grampos (ver Figura 9); ii) conectores; iii) juntas armadas (ver Figura 10); iv) relações entre dimensões (limitar esbelteza das paredes); v) elementos de alvenaria complementares; vi) cantoneiras de apoio and vii) pilaretes, cintas; entre outros.

O Eurocódigo 8 [CEN, 2004] identifica exemplos de medidas, de acordo com a classe de ductilidade, para melhorar a integridade e comportamento dos painéis de alvenaria no plano e fora do plano: inclusão de armaduras de junta bem conectadas entre panos de parede, ancoras de conexão com os elementos de betão armado confinantes e pilaretes de contraventamento com a espessura da parede.

Se houver grandes aberturas em qualquer um dos painéis de alvenaria enchimento, os cantos devem ser confinados com elementos construtivos de betão armado. O Eurocódigo 6 [CEN, 2005], na recomendação para a ligação entre as paredes de duas folhas impõe que estas devem ser efectivamente ligadas com conectores, com um mínimo de 2 conectores/ m².

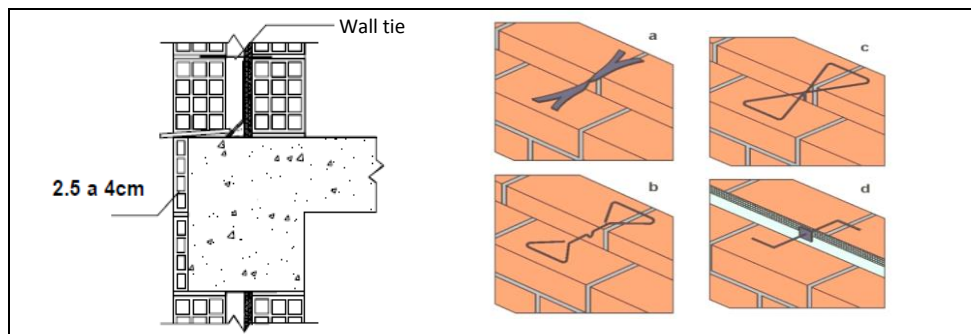


Figura 9: Grampeamento – exemplos de grampos para paredes de alvenaria com dois panos

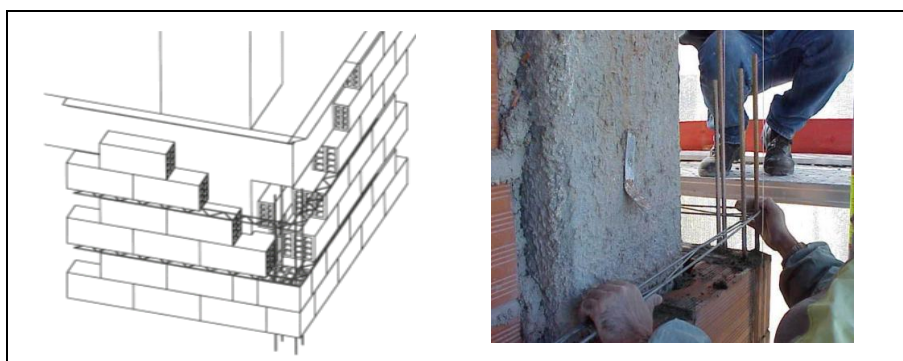


Figura 10. Painéis de alvenaria com juntas horizontais armadas

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Da visita técnica realizada após o sismo de Abruzzo, foi notório que a pormenorização e execução das paredes de alvenaria de enchimento não estão suportadas no mais recente conhecimento, em especial paredes de alvenaria de enchimento da envolvente e a forma como estas são executadas para a correcção de pontes térmicas. A correcção das pontes térmicas externas, continua a ser um problema da construção devido ao insuficiente conhecimento tecnológico sobre este assunto.

O dimensionamento e verificação da segurança das alvenaria não-estruturais e deve ser promovido, especialmente no que diz respeito à adequada pormenorização dos pontos singulares. O estímulo à utilização de métodos de dimensionamento que considerem a avaliação das tensões e os movimentos devido a diferentes acções (vento e acção sísmica, expansão térmica e humidade) é fundamental para identificar possíveis problemas.

Pelas razões identificadas é importante a verificação das construções recentes (onde a correcção de pontes térmicas foi aplicada) de compreender o seu comportamento para evitar erros futuros e desenvolver medidas de correcção e reforço. É necessário promover as boas práticas de construção, com a utilização de ligadores, armadura de juntas, conectores dentre panos de alvenaria, especialmente em paredes parcialmente suportados. Todas as normas e recomendações consultadas devem apresentar soluções concretas para não paredes estruturais, com a indicação de soluções de testadas e validadas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a toda a equipa técnica da Universidade de Aveiro e da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Agradecem ainda à Protecção Civil Italiana, aos corpos de bombeiros e ao Professor Giorgio Monti da Universidade de Roma, pela ajuda em garantir o acesso com segurança às zonas afectadas.

7. REFERÊNCIAS

- Hendry, A. W, Sinha, B.P, Davies, S.R. (1997). Design of masonry structures. Load bearing brickwork design, 3rd edition.
- Vicente, R, and Mendes da Silva, J.A:R (2006). Defects of non-loadbearing masonry walls due to partial basal supports. *Journal of Construction and Building Materials*, Elsevier, 21, pp 1977–1990.
- Crisafulli, F. J. ,Carr, A. J. and Park, R. (2000) Analytical modelling of infilled frames structures - A general review. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 33 , pp. 30-47.
- Rodrigues, H. Varum, H. Costa, A.G. (2009). Simplified macro-model for infill masonry panels. *Journal of Earthquake Engineering*, 14:3, pp 390 – 416.
- Varum, H. (2003). Seismic assessment, strengthening and repair of existing buildings Department of Civil Engineering, University of Aveiro , Portugal, PhD Thesis
- Fardis, M.N. (2006). Seismic design issues for masonry-infilled RC frames. In: Proceedings of the first European conference on earthquake engineering and seismology. Paper 313.
- CEN (2004). Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance – Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardisation, Brussels.
- CEN (2005). Eurocode 6: Part 1-1 – General Rules for buildings – Rules for reinforced and unreinforced masonry, European Committee for Standardisation, Brussels.
- FEMA 310 (1998). NEHRP handbook for the seismic evaluation of existing buildings – a Prestandard; Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- ATC-40 (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings; Technical report, ATC-40. Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Magenes, G. e Pampanin, S. (2004) 13th World Conference on Earthquake Engineering. Seismic response of gravity-load design frames with masonry infills Vancouver, B.C, Canada.
- FEMA-306 (1999) Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings - Basic Procedures Manual Federal Emergency Management Agency , Washington, D.C
- FEMA-307 (1999) Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings - Technical Resources Federal Emergency Management Agency , Washington, D.C
- Bell, D. K. e Davidson, B. J. (2001) Evaluation of earthquake risk buildings with masonry infill panels. 2001 Technical Conference, Future Directions: A Vision for Earthquake Engineering in New Zealand *New Zealand Society for Earthquake Engineering Taupo* New Zealand
- Valiasis, T. N. e Stylianidis, K. C. (1989) Masonry infilled R/C frames under horizontal loading — experimental results. *European Earthquake Engineering* 3:3 , pp. 10-20.
- Freeman, S. A. (1977) Racking tests of high rise building partitions. *Journal of Structural Division ASCE* 103:ST8.